

УДК 534.29

ПРИМЕНЕНИЕ РАССЕЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО СВЕТА ДЛЯ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ РАСТВОРЕНИЯ ЗАРОДЫШЕЙ КАВИТАЦИИ

А.Ф. ГРИБ, А.В. КОТУХОВ, Н.А. ЖАРКО, М.П. ФЕДОРИНЧИК, Н.В. ДЕЖКУНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Беларусь*

Аннотация. Приведено описание установки, предназначенной для исследования кавитации с использованием рассеяния лазерного света на кавитационных пузырьках и некоторые предварительные результаты. Показано, что интенсивность рассеянного кавитационной областью света увеличивается при увеличении угла рассеяния от 270° до 360° , т.е. рассеяние происходит в основном в направлении “вперед” по отношению к направлению распространения зондирующего луча. Согласно теории рассеяния света, такой тип рассеяния наблюдается, если размер рассеивателей (в данном случае – кавитационных полостей) не превышает длину волны рассеиваемого света.

Ключевые слова: ультразвук, кавитация, рассеяние света, лазерное излучение, фотоприемник, излучатель, зондирование, интенсивность, индикатрисса рассеяния.

APPLICATIONS OF LASER LIGHT SCATTERING FOR ESTIMATION OF THE DISSOLUTION RATE OF CAVITATION NUCLES

A.F. GRIB, A.V. KOTUHOV, N.A. ZHARKO, M.P. FEDORINCHIK, N.V. DEZHKUNOV

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronic
Minsk, Belarus*

Abstract. A description is given of a setup designed to study cavitation using laser light scattering by cavitation bubbles and some preliminary results. It is shown that the intensity of the light scattered by the cavitation region increases with an increase in the scattering angle from 270° to 360° , i.e. scattering occurs mainly in the “forward” direction with respect to the direction of propagation of the probing beam. According to the theory of light scattering, this type of scattering is observed if the size of the scatterers (in this case, cavitation cavities) does not exceed the wavelength of the scattered light.

Keywords: ultrasound, cavitation, light scattering, laser radiation, photodetector, emitter, probing, intensity, indicatrix, generation.

Введение

Кавитация является ключевым фактором ультразвуковой интенсификации физико-химических явлений в звукохимии и технологических процессах [1, 2, 3]. В медицине ультразвук применялся до недавнего времени в терапии и при различного рода исследованиях. При этом, как известно [4], используются интенсивности ниже порога кавитации.

В последние годы обнаружены новые возможности воздействия ультразвуком в кавитационном режиме на биологические структуры, например: подавление жизнедеятельности опухолевых клеток [5], усиление действия лекарств или выделение лекарств из носителей [6], повышение проникающей способности лекарств через мембраны клеток – сонопорация [7] и другие.

Закономерности генерирования кавитации в мощных ультразвуковых полях исследуются уже несколько десятилетий. Тем не менее до сих пор многие аспекты этого явления не выяснены однозначно. Известно, что при захлопывании кавитационный пузырек распадается на мелкие осколки, каждый из которых может служить новым зародышем кавитации. В результате реализуется динамика развития кавитации по механизму цепной реакции, когда с каждым новым периодом колебаний число пузырьков в кавитационной области растет

лавинообразно [1]. При этом, если интенсивность ультразвука значительно выше порога кавитации, концентрация пузырьков может достигать настолько больших величин, что они начинают взаимодействовать друг с другом за счет ударных волн и сил Бьеркнесса. Как следствие снижается эффективность преобразования энергии ультразвука в другие виды энергии и уменьшается интенсивность кавитационного воздействия на физико-химические процессы в жидкостях и на биологические структуры. Эффективность преобразования и концентрации энергии ультразвука кавитационными пузырьками зависит от множества факторов, среди которых динамика развития кавитационной области и распределение пузырьков по размерам имеют первостепенное значение [8]. В данной работе представлены результаты испытаний лазерной установки для исследования динамики развития кавитационной области и распределения пузырьков по размерам.

Установка и методика проведения эксперимента

Схема установки представлена на рис. 1. Принцип работы установки состоит в следующем. Луч полупроводникового лазера (длина волны 405нм, 532нм или 650нм) пройдя через телескоп (для расширения пучка) и диафрагму, попадает в цилиндрическую кювету с исследуемой жидкостью. На выходе из кюветы рассеянное излучение попадает в фотоприемник, сигнал с которого регистрируется с помощью цифрового осциллографа. С целью отстройки от фоновых засветок используется импульсное модулирование свечения лазера. Преобразователь ультразвуковых колебаний установлен таким образом, что его излучающая поверхность находится на 5 мм выше луча (рис. 2).

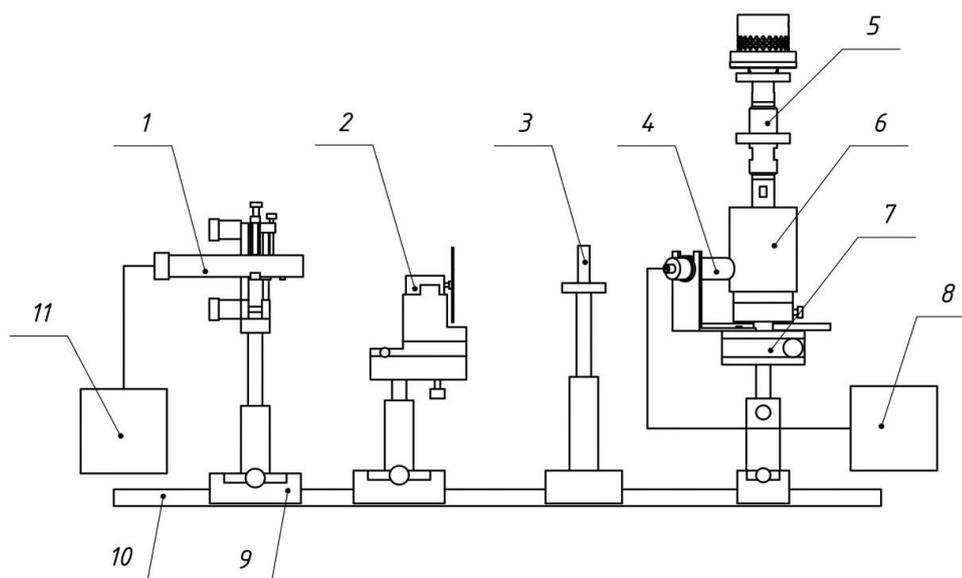


Рис. 1. Схема лазерной установки для исследования кавитации:

1 – лазер; 2 – модулятор; 3 - диафрагма; 4 – фотодиод; 5 – излучатель УЗ колебаний; 6 – цилиндрическая кювета с жидкостью; 7 – поворотный столик; 8 – осциллограф; 9 – рейтер; 10 – оптический рельс, 11 – блок питания лазера.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлен общий вид кюветы с погруженным излучателем и включенным лазером: 2а - без ультразвука (при отключенном генераторе), 2б - с ультразвуком (фото справа). Рабочая жидкость – дистиллированная вода. Рассеяние, наблюдающееся при отсутствии ультразвука (рис. 2а), обусловлено наличием в жидкости зародышей кавитации, которыми в

соответствии с [9] могут служить стабилизированные микропузырьки воздуха или микрочастицы пыли.

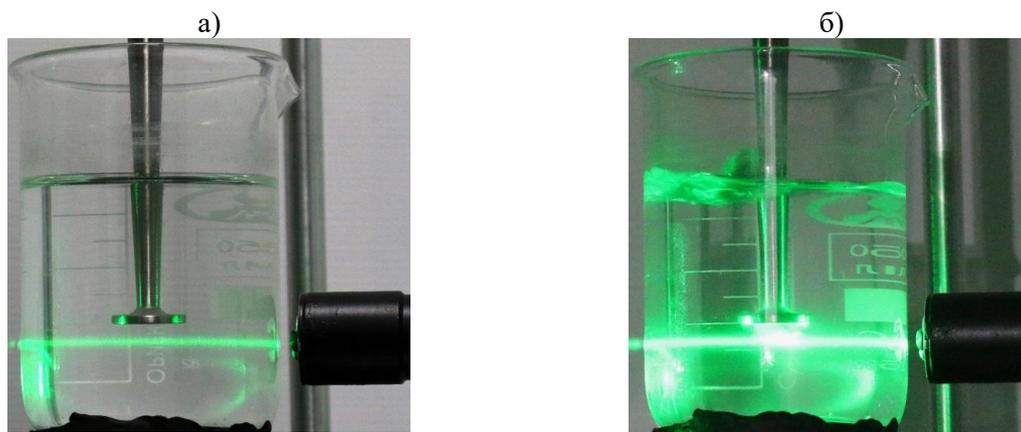


Рис. 2. Общий вид рассеяния лазерного света в кювете с дистиллированной водой: слева – без ультразвука, справа - при включенном излучателе, частота 22 кГц, мощность 75 Ватт.

Возникновение кавитации на пути луча света вызывает кардинальное изменение интенсивности и характера регистрируемых импульсов. На рис. 3 приведены результаты регистрации выходного сигнала фотодиода, принимающего рассеянное излучение при работе лазера в импульсном режиме без ультразвука (а) и с ультразвуком (б). Частота следования импульсов лазерного излучения 10 кГц, оптическая ось фотоприемника образует угол 160° с направлением луча.

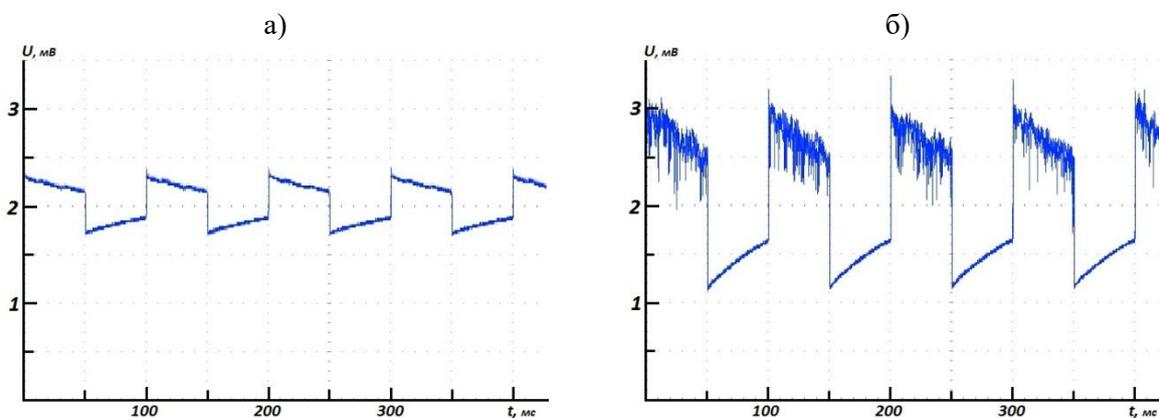


Рис. 3. Осциллограммы импульсов рассеянного лазерного излучения: а) – без ультразвука, б) - при включенном излучателе, частота 22 кГц, мощность 75 Ватт.

Рассеяние, наблюдающееся при отсутствии ультразвука (рис. 3а), обусловлено наличием в жидкости зародышей кавитации, которыми в соответствии с [8] обусловлено наличием в жидкости зародышей кавитации, которыми в соответствии с [9] могут служить стабилизированные микропузырьки воздуха или микрочастицы пыли, взвешенные в жидкости. Возникновение кавитации на пути луча света вызывает кардинальное изменение интенсивности и характера регистрируемых фотодиодом импульсов (рис. 3б). Большой разброс интенсивности рассеянного на кавитационных пузырьках света указывает на соответствующие вариации плотности пузырьков в кавитационной области. Большой разброс интенсивности рассеянного

на кавитационных пузырьках света указывает на соответствующие вариации плотности пузырьков в кавитационной области.

На рис. 4 приведены индикатриссы рассеяния лазерного света с ультразвуком и без ультразвука. Для построения индикатрисс фотоприемник перемещали вокруг оси кюветы и через каждые 10° регистрировали выходной сигнал фотумножителя. Горизонтальная линия на рис.4 соответствует оси луча; направление $180^\circ - 0^\circ$ – направление распространения света.

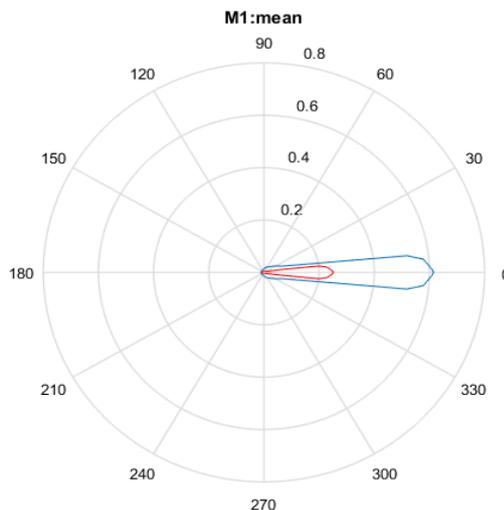


Рис. 4. Индикатрисса рассеяния лазерного излучения: внутренняя зависимость - рассеяние в жидкости без кавитации, внешняя – в кавитационной области.

Интенсивность рассеянного кавитационной областью света увеличивается при увеличении угла рассеяния от 270° до 360° , т.е. рассеяние происходит в основном в направлении “вперед” по отношению к направлению распространения зондирующего луча. Согласно теории рассеяния света [9] такой тип рассеяния наблюдается, если размер рассеивателей (в данном случае – кавитационных полостей) не больше длины волны рассеиваемого света. Развернутый анализ индикатрисс рассеяния позволит оценивать распределение пузырьков по размерам.

На рисунке 5 представлены результаты регистрации интенсивности рассеянного света I_p при отключении ультразвука при различных температурах.

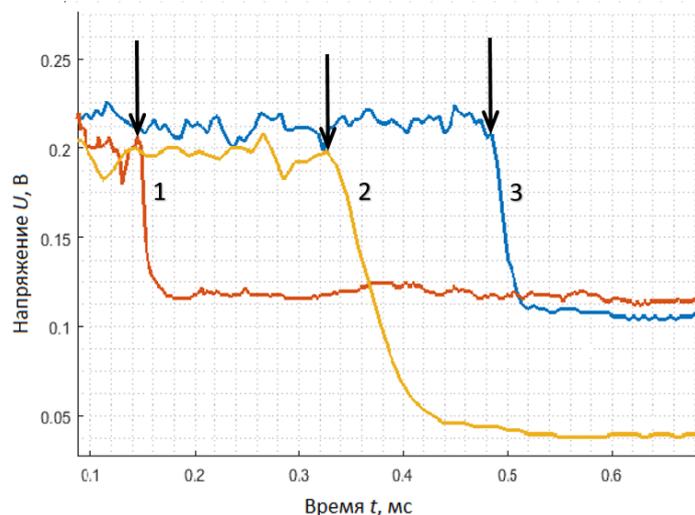


Рис. 5. Динамика изменения интенсивности рассеянного света при отключении ультразвука: 1 – 20°C , 2 – 30°C , 3 – 70°C ; моменты отключения для каждого из режимов отмечены стрелками.

После отключения I_p быстро уменьшается. Наклон зависимости $I_p(t)$ позволяет оценить скорость растворения зародышей кавитации, образовавшихся в кавитационной области. В данном примере видно, что релаксация кавитационных свойств жидкости, обусловленная растворением зародышей кавитации замедляется с повышением температуры.

Заключение

Создана установка и разработана методика исследования кавитации с использованием рассеяния лазерного света на кавитационных пузырьках. Представлены результаты испытаний. Показано, что интенсивность рассеянного кавитационной областью света увеличивается при увеличении угла рассеяния от 270° до 360° , т.е. рассеяние происходит в основном в направлении “вперед” по отношению к направлению распространения зондирующего луча. Согласно теории рассеяния света, такой тип рассеяния наблюдается, если размер рассеивателей (в данном случае – кавитационных полостей) не превышает длину волны рассеиваемого света. Наклон зависимости интенсивности рассеянного света от времени после отключения ультразвука позволяет оценить скорость растворения зародышей кавитации, образовавшихся в кавитационной области. Установлено, что релаксация кавитационных свойств жидкости, обусловленная растворением зародышей кавитации замедляется с повышением температуры.

В докладе представлены результаты, полученные в ходе выполнения задания «Разработать и изготовить ультразвуковой кавитационный комплекс (УЗКК)» ГНТП «Эталоны и научные приборы».

Список литературы

1. Сиротюк М. Г. *Акустическая кавитация*. М.: Наука; 2008. 271С.
2. Хмелев В.Н., Сливин А.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. *Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности*. Бийск: Издательство Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова; 2010. 250 С.
3. Промтов, М.А. *Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов*. Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. 2008. Т. 14, №4. С. 861–869.
4. Улащик, В.С. *Ультразвуковая терапия*. Минск; 1983. 254 С.
5. Протопович Е. Л., Церковский Д. А. *Противоопухолевая эффективность сонодинамической терапии с фотосенсибилизатором хлоринового ряда в эксперименте*. Российский биотерапевтический журнал. Том 21, № 1, 2022. DOI: 10.17650/1726-9784-2022-21-1-68-75.
6. Kooiman K., Roovers S., Langeveld S.A.G., Kleven R.T., Dewitte H. *Ultrasound-responsive cavitation nuclei for therapy and drug delivery*. Ultrasound in Medicine and Biology; 2021. V. 46 № 6. P. 1296-1325.
7. Chowdhury, S.M.; Abou-Elkacem, L.; Lee, T.; Dahl, J.; Lutz, A.M. Ultrasound and microbubble mediated therapeutic delivery: Underlying mechanisms and future outlook. *J. Control. Release* 2020, 326, 75–90.
8. Дежунов, Н.В. Исследования кавитации в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники: Сборник трудов XXXIV сессии Российского акустического общества 14-18 февраля 2022 / Дежунов Н. В. – Москва: Российское акустическое общество «АКИН», 2022. – С. 993–1003. DOI:10.34756/GEOS.2021.17.38058.
9. Борен К., Хафмен Д. *Поглощение и рассеяние света малыми частицами*. Москва: Мир, 1986.